

معرفی پارامتر فیزیکی-مکانیکی برای برآورد دوام سنگ‌های تراورتن

در برابر هوازدگی نمک

امین جمشیدی^۱، محمدرضا نیکودل^{۲*}، ماشالله خامه‌چیان^۳

پذیرش مقاله: ۹۶/۰۲/۱۹

دریافت مقاله: ۹۴/۰۶/۲۶

چکیده

دوام سنگ‌ها در برابر عوامل مخرب محیطی از مهمترین موضوعات مرتبط با انتخاب سنگ برای استفاده در سازه‌های مهندسی به ویژه سنگ نمای ساختمان‌ها می‌باشد. تبلور نمک‌های محلول یکی از مهمترین عوامل هوازدگی در طبیعت است که می‌تواند بر خصوصیات مکانیکی سنگ (مانند مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلین) تاثیر بگذارد و در طول زمان باعث زوال‌پذیری و کاهش دوام آن شود. در این پژوهش پارامتر فیزیکی-مکانیکی معرفی شده است که می‌تواند خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها و در نتیجه دوام آن‌ها را در برابر هوازدگی نمک با دقت و صحت مناسب برآورد کند. به منظور رسیدن به اهداف پژوهش، ۱۵ نمونه تراورتن از معادن مختلف ایران انتخاب شد. سپس مغزه‌های لازم برای تعیین خصوصیات فیزیکی (جذب آب، میانگین قطر حفره‌های نمونه‌ها) و خصوصیات مکانیکی (مقاومت فشاری تک محوری و کششی برزیلین) تهیه و مقادیر این خصوصیات تعیین شد. مقادیر پارامتر فیزیکی-مکانیکی که بر اساس ترکیبی از جذب آب، میانگین قطر حفره‌ها و خصوصیات مکانیکی می‌باشد، محاسبه شد. با انجام آنالیزهای رگرسیون دو متغیره، رابطه بین مقادیر پارامتر فیزیکی-مکانیکی با مقادیر مقاومت فشاری تک محوری و کششی برزیلین بعد از آزمایش هوازدگی نمک بررسی و مناسب ترین روابط برای برآورد دوام نمونه‌های مورد مطالعه با استفاده از پارامتر فیزیکی-مکانیکی در برابر هوازدگی نمک ارائه شده است. نتایج نشان دهنده دقت و صحت مناسب پارامتر فیزیکی-مکانیکی برای برآورد دوام نمونه‌های مورد مطالعه می‌باشد. در نهایت با استفاده از پارامتر فیزیکی-مکانیکی معرفی شده در پژوهش حاضر، می‌توان از انجام آزمایش زمان بر و پرهزینه هوازدگی نمک صرف‌نظر کرد.

کلید واژه‌ها: پارامتر فیزیکی-مکانیکی، دوام، مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی برزیلین

^۱. استادیار بخش زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد

^۲. دانشیار گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران nikudelm@yahoo.com

^۳. استاد گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۱. مقدمه

با توجه به شرایط اقلیمی متنوع ایران شامل مناطق بیابانی و نیمه بیابانی و همچنین سواحل شمالی و جنوبی، می‌توان گفت هوازدگی ناشی از وجود نمک‌های متبلور یکی از مهمترین عوامل تاثیر گذار روی دوام و در نتیجه زوال‌پذیری سنگ‌های استفاده شده در ساخت و احداث سازه‌های مهندسی می‌باشد.

(Rodriguez and Doehne (1999) و Tsui et al (2003) و Ruiz-Agudo et al (2007) بیان کردند مهمترین عامل در زوال‌پذیری و کاهش دوام سنگ‌ها در طی هوازدگی نمک، تخریب فیزیکی حاصل از فشار تبلور و فشار آگیری است. فشار تبلور حاصل از رشد بلورهای نمک مهمترین عامل در تخریب سنگ‌ها در طی آزمایش هوازدگی نمک است که به درجه اشباع محلول نمک و توزیع اندازه حفره‌های سنگ بستگی دارد (Benavente et al., 1999). با افزایش درجه اشباع محلول نمک فشار تبلور ناشی از آن در حفره‌های سنگ نیز بیشتر می‌شود (Benavente et al., 1999, Flatt, 2002).

تنش‌های کششی ایجاد شده به علت فشار تبلور نمک در طی آزمایش هوازدگی نمک در اکثر موارد بیشتر از مقاومت کششی سنگ‌ها هستند که این باعث گسیختگی شدید آن‌ها و در نتیجه کاهش دوام می‌شود (Tsui et al., 2003).

هوازدگی ناشی از تبلور محلول‌های نمک باعث تخریب شیمیایی و فیزیکی، تغییر در ظاهر (رنگ، زیبایی و شوره زدگی) و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های استفاده شده در سازه‌های مهندسی به ویژه در سنگ نمای ساختمان‌ها می‌شود. این تغییرات به نوبه خود باعث تغییر در دوام سنگ می‌شود که به عنوان معیار توانایی سنگ برای حفظ ویژگی-

های شاخص مانند استحکام، میزان مقاومت در برابر عوامل محیطی و همچنین حفظ نمای ظاهری آن تعریف می‌شود (Bell, 1993). از این رو ارزیابی دوام و زوال‌پذیری سنگ‌ها برای انتخاب آن‌ها برای استفاده در مناطقی که احتمال هوازدگی نمک وجود دارد، امری مفید و غیر قابل اجتناب است.

تاکنون جنبه‌های مختلفی از تاثیر هوازدگی نمک روی خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و همچنین دوام انواع سنگ‌ها مورد بررسی قرار گرفته است از جمله تحقیقات صورت گرفته توسط: (Scherer, 1999, Benavente et al., 2004, Yavuz, 2006, Benavante et al., 2007a, b, Urosevic et al., 2010, Schneider et al., 2011, Cultrone et al., 2012, Jamshidi et al., 2013) علاوه بر این تعدادی از محققین به بررسی الگوی تبلور، شرایط ترمودینامیکی تبلور نمک‌های مختلف و همچنین نحوه تبلور آن‌ها پرداخته‌اند (Benavente et al., 1999, Rodriguez-Navarro et al., 2000, Tsui et al., 2003, Angeli et al., 2010).

تا به امروز تعدادی روش برای برآورد دوام سنگ‌ها در برابر هوازدگی نمک مانند فاکتور دوام (Richardson, 1991)، برآورد کننده دوام (Ordonez et al., 1997) اندازه گیری افت وزنی نمونه‌ها (Benavente et al., 2001, Sousa et al., 2005, Benavente et al., 2007b, Zedef et al., 2007)، برآورد کننده دوام پتروفیزیکی (Benavente et al., 2004) و پارامتر شاخص تجزیه و سرعت تجزیه (Angeli et al., 2007) معرفی و استفاده شده است. به هر حال استفاده از روش‌های عددی سریع و آسان برای برآورد خصوصیات مکانیکی و در نتیجه دوام سنگ‌ها هنوز ضعیف است و پژوهش‌های بیشتری را می‌طلبد.

در این پژوهش پارامتر فیزیکو-مکانیکی برای سنگ‌های ساختمانی تراورتن (ترکیبی از جذب آب، میانگین قطر حفره-ها و خصوصیات مکانیکی) معرفی می‌شود که می‌تواند خصوصیات مکانیکی نمونه‌ها و در نتیجه دوام آن‌ها را با دقت و صحت مناسب در برابر هوازدگی نمک برآورد کند.

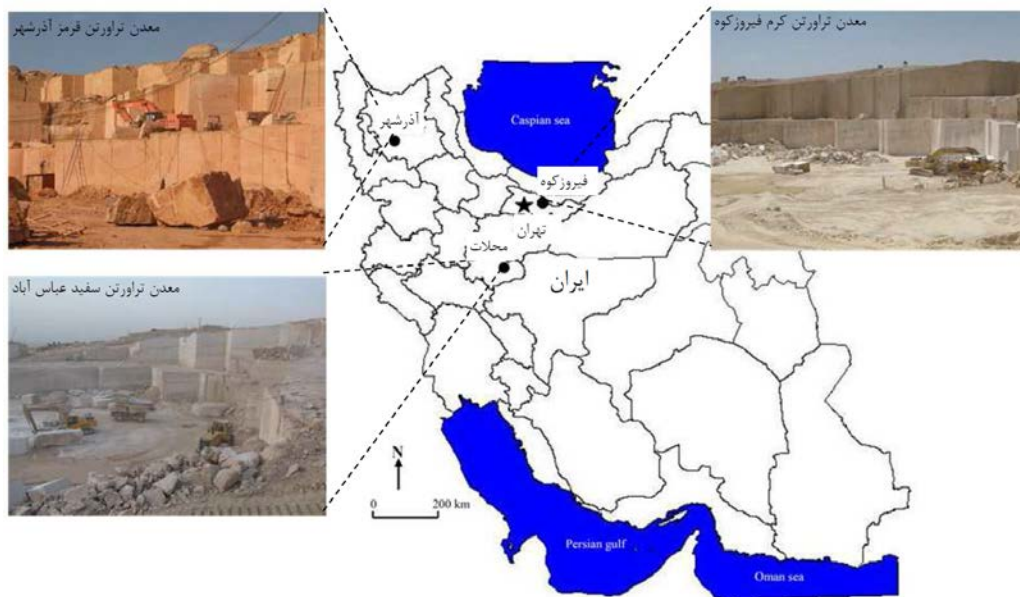
۲- مواد و روش پژوهش

۲-۱- نمونه برداری

امروزه تراورتن‌ها به دلیل شرایط استخراج ساده، مقاومت قابل قبول، برش‌پذیری آسان، زیبایی ظاهری، وجود تخلخل برای چسبیدن کامل به ملات و قیمت مناسب، کاربرد فراوانی به عنوان سنگ نمای بیرونی ساختمان‌ها در مناطق مختلف ایران دارند. به این منظور در پژوهش حاضر، بلوک‌هایی از ۱۵

معادن را نشان می‌دهد. پس از انتقال بلوک‌ها به آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس از آن‌ها نمونه‌ها و مغزه‌های لازم برای انجام آزمایش‌های پیش‌بینی شده شامل آزمایش‌های تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی و همچنین آزمایش هوازدگی نمک تهیه گردید.

سنگ ساختمانی تراورتن با ابعاد تقریبی (۴۰×۴۰×۳۰ سانتیمتر) شامل ۷ نمونه از معادن آذرشهر در استان آذربایجان شرقی، ۶ نمونه از معادن محلات در استان مرکزی و ۲ نمونه از معادن فیروزکوه در استان تهران تهیه شد. در نمونه‌برداری سعی شد بلوک‌ها از سینه کار معادن که در حال فعالیت بودن تهیه شوند. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی و تعدادی از این



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری و تصاویری از معادن اخذ نمونه‌ها

چگالی بالا ($2/55-2/75 \text{ g/cm}^3$) و سایر نمونه‌ها در رده سنگ‌های با چگالی متوسط ($2/20-2/55 \text{ g/cm}^3$) قرار می‌گیرند. همچنین مقادیر جذب آب نمونه‌ها از حداقل ۰/۲۰ درصد برای تراورتن سبز تا حداکثر ۲/۹۹ درصد برای تراورتن قرمز تغییر می‌کند (جدول ۱).

بر اساس مقادیر ارائه شده در جدول (۱) مشاهده می‌شود میانگین مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها به ترتیب بین ۳۳/۶ تا ۶۵/۷ نیوتن بر میلی‌متر مربع و میانگین مقاومت کششی برزیلین نمونه‌ها بین ۳/۸۹ تا ۶/۴۲ نیوتن بر میلی‌متر مربع متغیر است. با توجه به طبقه‌بندی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM, 2007) بر اساس مقاومت فشاری تک محوری، تراورتن گردویی، تراورتن طوسی، تراورتن قرمز، تراورتن سبز، تراورتن سفید، تراورتن سفید آبیبار، شکلاتی و

۲-۲- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی

برای تعیین خصوصیات فیزیکی شامل چگالی و جذب آب، خصوصیات مکانیکی شامل مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلین از روش استاندارد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM (1981) استفاده شده است. به این منظور تعداد ۵ نمونه از هر تراورتن برای تعیین هر خصوصیت استفاده شد. برای آزمایش‌های تعیین چگالی و جذب آب از نمونه‌های بی‌شکل و برای تعیین مقاومت فشاری تک محوری و کششی برزیلین، به ترتیب از نمونه‌های با نسبت طول به قطر تقریباً ۲ و ۰/۵ استفاده شد. نتایج تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی در جدول (۱) ارائه شده است. با توجه به طبقه‌بندی (Anon, 1979) بر اساس چگالی، تراورتن‌های قرمز، سبز و سفید دستجرد در رده سنگ‌های با

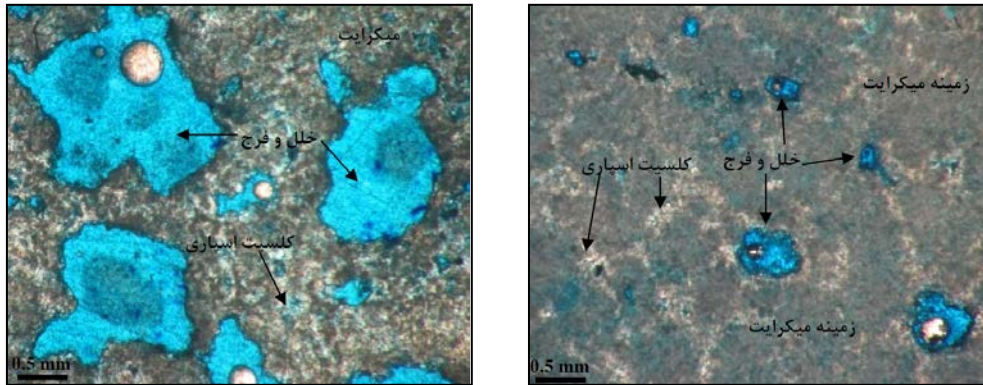
کرم فیروزکوه در رده سنگ‌های با مقاومت متوسط (۵۰-۱۰۰ N/mm²) و سایر نمونه‌ها در رده سنگ‌های با مقاومت پایین (۲۵-۵۰ N/mm²) قرار می‌گیرند.

جدول ۱. نتایج آزمون‌های تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها

محل نمونه برداری	نام تجاری	نام زمین شناسی	چگالی (g/cm ³)	جذب آب (%)	میانگین قطر حفره‌ها (میکرو متر)	مقاومت فشاری تک محوری (N/mm ²)	مقاومت کششی برزیلین (N/mm ²)
آذرشهر	تراورتن قرمز	تراورتن	۲/۴۸	۲/۹۹	۸۳/۲	۳۳/۶	۳/۸۹
آذرشهر	تراورتن گردویی	تراورتن	۲/۵۵	۱/۲۱	۹۹/۷	۶۰/۷	۵/۸۷
آذرشهر	تراورتن لیمویی	تراورتن	۲/۵۱	۱/۸۵	۷۰/۴	۴۲/۵	۴/۴۷
آذرشهر	تراورتن طوسی	تراورتن	۲/۴۶	۱/۴۳	۱۱۵/۷	۵۵/۵	۵/۷۱
آذرشهر	قرمز دستجرد	تراورتن انیکس	۲/۶۶	۰/۶۷	۶۳/۳	۶۵/۷	۶/۱۷
آذرشهر	سبز دستجرد	تراورتن انیکس	۲/۶۹	۰/۲۰	۵۸/۹	۶۴/۵	۵/۹۵
آذرشهر	سفید دستجرد	تراورتن انیکس	۲/۷۲	۰/۵۰	۳/۶	۶۲/۴	۶/۴۲
محلات	سفید آتشکوه	تراورتن	۲/۴۷	۱/۷۰	۷۷/۰	۴۹/۳	۴/۸۸
محلات	کرم عباس‌آباد	تراورتن	۲/۴۳	۲/۰۰	۷۴/۴	۴۱/۳	۴/۳۲
محلات	سفید عباس‌آباد	تراورتن	۲/۴۲	۱/۸۷	۹۱/۰	۴۳/۷	۴/۳۹
محلات	سفید آبیبار	تراورتن	۲/۴۱	۱/۴۷	۱۰۳/۲	۵۱/۴	۵/۳۳
محلات	کرم دره بخاری	تراورتن	۲/۳۸	۲/۶۹	۶۶/۰	۳۷/۴	۳/۷۱
محلات	کرم آتشکوه	تراورتن	۲/۴۶	۱/۷۲	۶۹/۹	۴۵/۷	۴/۶۹
فیروزکوه	شکلاتی فیروزکوه	تراورتن	۲/۳۸	۱/۲۷	۷۶/۶	۵۹/۹	۵/۹۰
فیروزکوه	کرم فیروزکوه	تراورتن	۲/۳۴	۱/۷۰	۶۸/۵	۵۰/۷	۵/۲۱

برای تعیین میانگین قطر حفره‌ها، از تراورتن‌های مورد مطالعه مقاطع نازک میکروسکوپی تهیه شد. قبل از تهیه مقاطع، نمونه‌ها در محلول Blue dye (ردیاب آبی) تحت فشار خلا قرار گرفتند که باعث نفوذ محلول به درون ساختار سنگ تا جایی که خلل و فرج و ریزترک‌های سنگ به هم متصل هستند، می‌شود. با این روش می‌توان ارزیابی دقیق‌تری از تخلخل سنگ داشت. در واقع خلل و فرج نمونه‌ها توسط محلول فوق پر می‌شوند و در مقاطع نازک، خلل و فرج پر

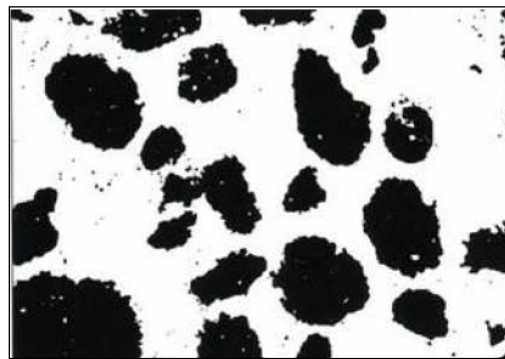
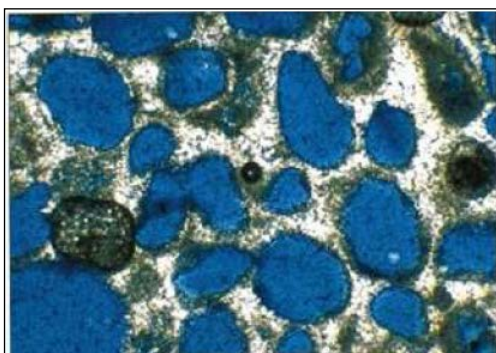
شده در زیر میکروسکوپ به رنگ آبی دیده می‌شوند. مزیت استفاده از ردیاب آبی رنگ این است که احتمال کمی می‌رود اجزای سنگ به طور طبیعی آبی رنگ باشند و به راحتی می‌توان عناصر تخلخل را از سایر اجزای سنگ در مقاطع تشخیص داد (Ehrlich et al., 1991). در شکل (۲) نمونه‌ای از مقاطع نازک میکروسکوپی تهیه شده برای تراورتن کرم عباس‌آباد محلات و تراورتن شکلاتی فیروزکوه نشان داده شده است.



شکل ۲. تصویر مقاطع نازک میکروسکوپی تصویر سمت راست) تراورتن کرم عباس آباد محلات تصویر سمت چپ) تراورتن شکلاتی فیروزکوه

با رنگ سیاه و سایر اجزای سنگ مانند دانه‌ها، سیمان و ماتریکس با رنگ سفید مشخص می‌شوند (شکل ۳). در نهایت با یکسری عملیات زمانبر روی تصاویر تهیه شده از مقاطع نازک با استفاده از نرم افزار Image Tool قطر میانگین حفره‌های موجود در هر نمونه تراورتن تعیین شد. نتایج تعیین میانگین قطر حفره‌های نمونه‌ها در جدول (۱) ارائه شده‌اند.

در ضمن بررسی و مطالعه مقاطع نازک میکروسکوپی، با استفاده از دوربین دیجیتال تصاویری با بزرگنمایی مختلف تهیه گردید که در این میان، تصاویر با بزرگنمایی ۲۵X از کیفیت مناسبتری برخوردارند. در ادامه با استفاده از نرم افزار Image Tool فیلترهایی روی تصاویر اعمال شد. از جمله این فیلترها تبدیل تصاویر رنگی به سیاه و سفید است که حفره‌ها



شکل ۳. اعمال فیلتر روی تصاویر تهیه شده از مقاطع نازک میکروسکوپی به وسیله نرم افزار Image Tool تصویر سمت راست) تصویر اولیه تهیه شده از مقاطع نازک میکروسکوپی تصویر سمت چپ) تصویر مقاطع نازک میکروسکوپی بعد از اعمال فیلتر به وسیله نرم افزار Image Tool

بستگی دارد (Nicholson and Nicholson, 2000, Hale and Shakoor, 2003, Tugrul, 2004, Chen et al., 2004, Bayram, 2012). دوام سنگ‌ها در برابر عوامل هوازدگی دارای یک رابطه مستقیم با خصوصیات مکانیکی آن‌ها دارد به طوری که با

۳-۲- پارامتر فیزیکی-مکانیکی

مطالعات گذشته در زمینه دوام سنگ نشان داده که تغییر در خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها و بنابراین دوام آن‌ها در برابر عوامل هوازدگی به پارامترهای مختلفی مانند خصوصیات مکانیکی در شرایط بکر، جذب آب و قطر میانگین حفره‌ها

مقاومت فشاری تک محوری به عنوان خصوصیت ورودی استفاده شود پارامتر فیزیکی-مکانیکی به صورت PMP_{UCS0} نشان داده می‌شود، و در صورتی که مقاومت کششی برزیلین به عنوان خصوصیت ورودی باشند به صورت PMP_{BTS0} خواهد بود.

در جدول (۱) خصوصیات ورودی برای تعیین پارامتر فیزیکی-مکانیکی ارائه شده است. با استفاده از معادله ۱ مقادیر این پارامتر بر اساس اینکه از مقاومت فشاری تک محوری یا مقاومت کششی برزیلین استفاده شده است تعیین و در جدول (۲) ارائه شده‌اند.

۲-۴- آزمایش هوازگی نمک

آزمایش هوازگی نمک روی نمونه‌ها در یک محلول ۱۴ درصد وزنی محلول سولفات سدیم (Na_2SO_4) مطابق با استاندارد (EN 12370 (1999) تا ۶۰ چرخه انجام شد. برای هر چرخه آزمایش هوازگی نمک، ابتدا نمونه‌ها به مدت ۶ ساعت در استخر محلول ۱۴ درصد وزنی سولفات سدیم قرار گرفتند (مرحله غوطه‌ورسازی)، سپس نمونه‌ها به مدت ۱۶ ساعت در گرمخانه با دمای 100 ± 5 درجه سانتیگراد قرار داده شدند (مرحله خشک شدن). بعد از این مرحله، نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در دمای اتاق قرار گرفتند تا به طور کامل سرد شوند (مرحله سرد شدن). شکل (۴) منحنی دمایی یک چرخه هوازگی نمک را نشان می‌دهد. بعد از آزمایش هوازگی نمک، مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلین نمونه‌ها مطابق استاندارد (ISRM (1981) اندازه‌گیری شد. نتایج تعیین مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلین نمونه‌ها بعد و قبل از آزمایش هوازگی نمک و همچنین جذب و میانگین قطر حفره‌ها در جدول (۳) ارائه شده‌اند.

افزایش مقدار خصوصیات مکانیکی، دوام سنگ‌ها نیز افزایش می‌یابد (Zeza, 1990, Valdeon et al., 1996, Goudie, 1999b, Nicholson, 2001, Benavente et al., 2007b)

همچنین محققان نشان داده‌اند که دوام سنگ‌ها در برابر عوامل هوازگی دارای یک رابطه مستقیم با میانگین قطر حفره‌ها (Kozlowski et al., 1990, Scherer, 1999, Topal and Doyuran, 1997, Goudie, 1999a, Benavente et al., 2007b, Yu and Oguchi, 2010) و یک رابطه معکوس با مقدار جذب آب دارد (Winkler, 1994, Ceryan, 1999, Benavente et al., 2004).

با توجه به این مطالب، در پژوهش حاضر پارامتر فیزیکی-مکانیکی برای برآورد خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها و بنابراین دوام آن‌ها در برابر هوازگی نمک معرفی می‌شود که به طور همزمان خصوصیات مکانیکی در شرایط بکر، جذب آب و میانگین قطر حفره‌ها نمونه‌ها را مد نظر قرار می‌دهد.

فرم کلی پارامتر فیزیکی-مکانیکی (Physico-Mechanical) به صورت معادله ۱ است:

$$PMP (N/mm) = \left(\frac{MS \times MPS}{Wa} \right) \quad (1)$$

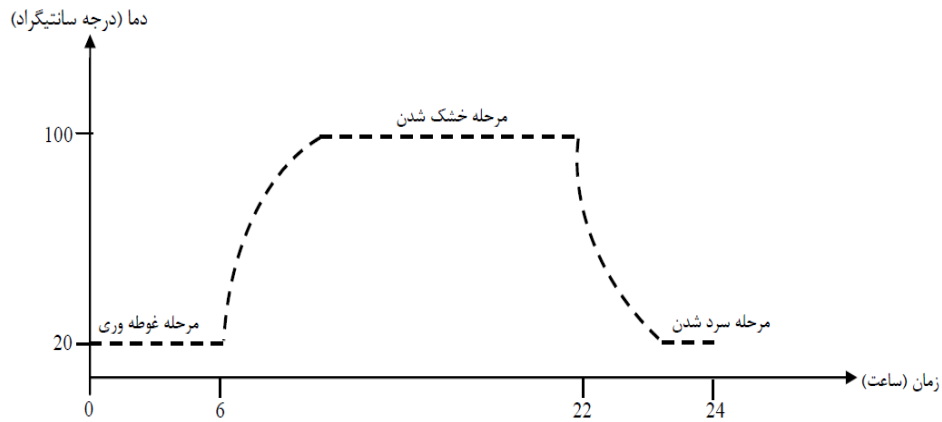
که در آن MS خصوصیات مکانیکی بر حسب نیوتن بر میلیمتر مربع (مقاومت فشاری تک محوری یا مقاومت کششی برزیلین)، MPS و Wa به ترتیب میانگین قطر حفره‌ها بر حسب میکرومتر و جذب آب نمونه‌ها می‌باشد. لازم به ذکر است که واحد پارامتر فیزیکی مکانیکی بر حسب نیوتن بر میلیمتر (N/mm) خواهد بود.

پارامتر فیزیکی-مکانیکی معرفی شده در معادله ۱ رابطه مستقیمی با خصوصیات مکانیکی و میانگین قطر حفره‌ها و دارای یک رابطه معکوس با جذب آب دارد. بیشتر بودن این پارامتر نشان دهنده بیشتر بودن دوام نمونه‌ها در برابر عوامل هوازگی مانند هوازگی ناشی از تبلور نمک است.

اندیس این پارامتر بر اساس اینکه از چه خصوصیت مکانیکی برای تعیین آن استفاده شوند متفاوت می‌باشد. هنگامی که

جدول ۲. مقادیر پارامتر فیزیکی-مکانیکی نمونه‌ها

مقاومت کششی برزیلین، میانگین قطر حفره‌ها، جذب آب	مقاومت فشاری تک محوری، میانگین قطر حفره‌ها، جذب آب	خصوصیات ورودی
PMP _{BTS0}	PMP _{UCS0}	اندیس پارامتر
۰/۱۰۸	۰/۹۳۵	تراورتن قرمز
۰/۴۸۴	۵/۰۰۱	تراورتن گردویی
۰/۱۷۰	۱/۶۱۸	تراورتن لیمویی
۰/۴۶۲	۴/۴۹۰	تراورتن طوسی
۰/۵۸۳	۶/۲۰۷	قرمز دستجرد
۰/۱۶۱	۱۸/۹۹۵	سبز دستجرد
۰/۲۱۴	۰/۴۵۴	سفید دستجرد
۰/۲۲۱	۲/۲۳۳	سفید آتشکوه
۰/۱۶۱	۱/۵۳۶	کرم عباس‌آباد
۰/۲۱۴	۲/۱۲۷	سفید عباس‌آباد
۰/۳۷۴	۳/۶۰۸	سفید آبیار
۰/۰۹۱	۰/۹۱۸	کرم دره بخاری
۰/۱۹۱	۱/۸۵۷	کرم آتشکوه
۰/۳۵۶	۳/۶۱۳	شکلاتی فیروزکوه
۰/۲۱۰	۲/۰۴۳	کرم فیروزکوه



شکل ۴. منحنی دمایی یک چرخه هوازدگی نمک

جدول ۳. جذب آب و میانگین قطر حفره‌های نمونه‌ها و مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلین نمونه‌ها قبل و بعد

از آزمایش هوازگی نمک

مکانیکی نام تجاری	خصوصیت	جذب آب (%)	میانگین قطر حفره‌ها (میکرو متر)	مقاومت فشاری تک محوری قبل از آزمایش (N/mm ²)	مقاومت فشاری تک محوری بعد از آزمایش (N/mm ²)	مقاومت کششی برزیلین قبل از آزمایش (N/mm ²)	مقاومت کششی برزیلین بعد از آزمایش (N/mm ²)
تراورتن قرمز		۲/۹۹	۸۳/۲	۳۳/۶	۲۰/۱	۳/۸۹	۲/۳۵
تراورتن گردویی		۱/۲۱	۹۹/۷	۶۰/۷	۴۳/۷	۵/۸۷	۴/۰۷
تراورتن لیمویی		۱/۸۵	۷۰/۴	۴۲/۵	۳۱/۰	۴/۴۷	۳/۲۸
تراورتن طوسی		۱/۴۳	۱۱۵/۷	۵۵/۵	۴۰/۰	۵/۷۱	۴/۰۰
قرمز دستجرد		۰/۶۷	۶۳/۳	۶۵/۷	۵۴/۴	۶/۱۷	۴/۹۹
سبز دستجرد		۰/۲۰	۵۸/۹	۶۴/۵	۵۲/۴	۵/۹۵	۴/۹۴
سفید دستجرد		۰/۵۰	۳/۶	۶۲/۴	۵۲/۴	۶/۴۲	۵/۲۶
سفید آتشکوه		۱/۷۰	۷۷/۰	۴۹/۳	۳۳/۶	۴/۸۸	۳/۲۶
کرم عباس‌آباد		۲/۰۰	۷۴/۴	۴۱/۳	۲۵/۵	۴/۳۲	۲/۷۲
سفید عباس‌آباد		۱/۸۷	۹۱/۰	۴۳/۷	۳۱/۹	۴/۳۹	۳/۰۵
سفید آبیبار		۱/۴۷	۱۰۳/۲	۵۱/۴	۴۰/۵	۵/۳۳	۴/۰۱
کرم دره بخاری		۲/۶۹	۶۶/۰	۳۷/۴	۲۴/۳	۳/۷۱	۲/۴۴
کرم آتشکوه		۱/۷۲	۶۹/۹	۴۵/۷	۳۶/۳	۴/۶۹	۳/۷۰
شکلاتی فیروزکوه		۱/۲۷	۷۶/۶	۵۹/۹	۴۱/۳	۵/۹۰	۴/۲۳
کرم فیروزکوه		۱/۷۰	۶۸/۵	۵۰/۷	۳۷/۵	۵/۲۱	۳/۸۳

۳- نتایج و بحث

۳-۱- برآورد دوام نمونه‌ها در برابر هوازگی نمک

به منظور استفاده از پارامتر فیزیکی-مکانیکی برای برآورد دوام نمونه‌ها، همبستگی بین پارامتر فیزیکی-مکانیکی بر حسب مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلین (جدول ۲) با همان خصوصیات بعد از آزمایش هوازگی نمک (جدول ۳) با انجام آنالیز رگرسیون دو متغیره برقرار شد.

برای انجام آنالیزهای رگرسیون سعی شده که بهترین منحنی بر داده‌ها برازش شود به طوری که بیشترین ضریب تعیین (R^2) را داشته باشند. نمودارهای مربوط به آنالیزهای انجام شده در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده‌اند.

مشاهده می‌شود یک همبستگی لگاریتمی بین مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلین بعد از آزمایش

هوازگی نمک با پارامتر فیزیکی-مکانیکی به ترتیب با ضرایب تعیین ۰/۸۶۹ و ۰/۸۰۱ مطابق معادله‌های ۲ و ۳ وجود دارد:

$$UCS_{60} = 12.49 \ln(PMP_{UCS0}) + 24.10 \quad R^2 = 0.869 \quad (2)$$

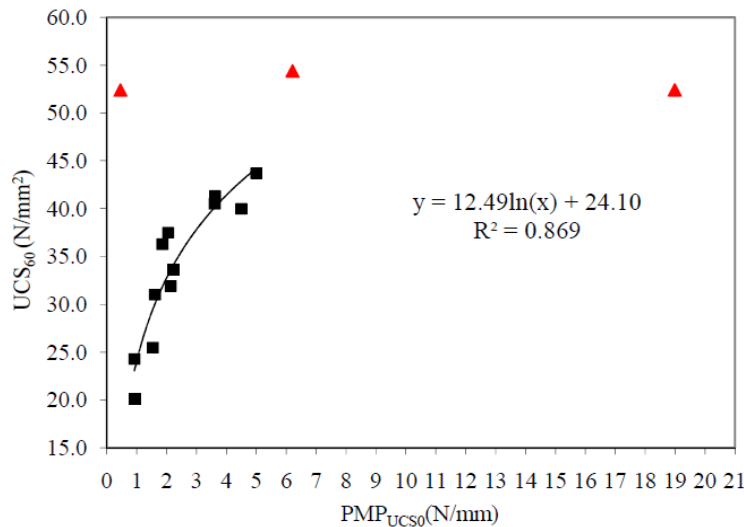
$$BTS_{60} = 1.10 \ln(PMP_{BTS0}) + 5.07 \quad R^2 = 0.801 \quad (3)$$

که در آن‌ها PMP_{UCS0} پارامتر فیزیکی-مکانیکی بر حسب مقاومت فشاری تک محوری، PMP_{BTS0} پارامتر فیزیکی-مکانیکی بر حسب مقاومت کششی برزیلین، UCS_{60} و BTS_{60} به ترتیب مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلین بعد از آزمایش هوازگی نمک می‌باشند.

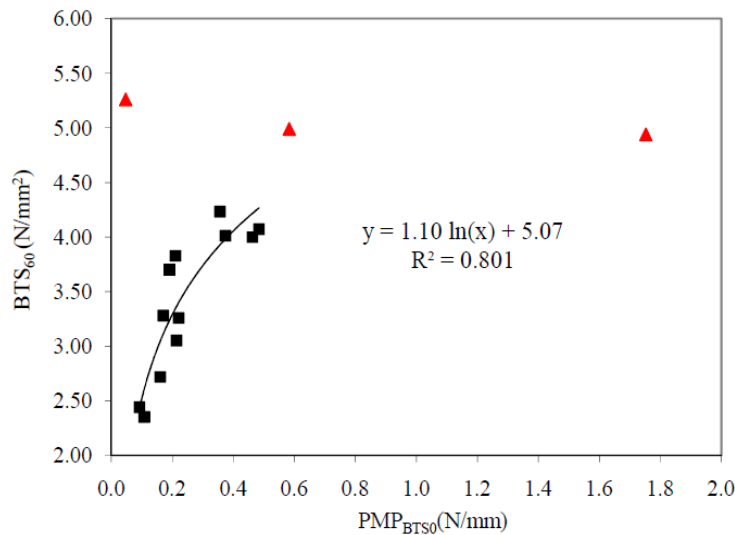
لازم به ذکر است معادله‌های ۲، ۳ و ضرایب تعیین محاسبه شده برای آن‌ها بدون در نظر گرفتن تراورتن‌های انیکس یعنی نمونه‌های قرمز دستجرد، سبز دستجرد و سفید دستجرد می‌باشند (جدول ۱). این نمونه‌ها که باعث ناهنجاری در روند منحنی‌های برازش شده‌اند به صورت نقاط قرمز رنگ و شکل مثلث در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده‌اند. دلیل ناهنجاری نمونه‌های فوق به خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و بافتی آن‌ها مربوط می‌شود.

ترمودینامیکی رسوبگذاری می‌شوند باعث ایجاد بافت متراکم و تقریباً بدون خلل و فرج در آن‌ها نسبت به سایر نمونه‌های تراورتن شده است. این نوع بافت و همچنین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی تراورتن‌های انیکس باعث متفاوت بودن رفتار آن‌ها در برابر آزمایش هوازدگی نمک در مقایسه با سایر تراورتن‌های مورد مطالعه شده‌اند.

تراورتن‌های انیکس در پژوهش حاضر دارای جذب آب و میانگین قطر حفره‌های پایین‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها هستند و این در صورتی است که مقادیر مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلین آن‌ها بیشتر از سایر نمونه‌ها می‌باشد (جدول ۱ مشاهده شود). علاوه بر این نحوه تشکیل تراورتن‌های انیکس که در شرایط خاص



شکل ۵. همبستگی مقاومت فشاری تک محوری بعد از آزمایش هوازدگی نمک و پارامتر فیزیکو-مکانیکی



شکل ۶. همبستگی مقاومت کششی برزیلین بعد از آزمایش هوازدگی نمک و پارامتر فیزیکو-مکانیکی

به منظور صحت سنجی پارامتر فیزیکو-مکانیکی (معادله‌های ۲ و ۳) از مفهوم سطح معنی داری (*Sig.*) و آزمون *t* استیودنت (*t-test*) استفاده شده است.

۳-۲-صحت سنجی پارامتر فیزیکو-مکانیکی در برآورد دوام نمونه‌ها در برابر هوازدگی نمک

تمام روابط آماری به یک مقدار P -value یا مقدار احتمال (در بعضی متون علمی تحت عنوان سطح معنی داری یا $Sig.$ معرفی می‌شود) ختم می‌شوند. سطح معنی داری اساس پذیرش معنی داری آماری نتایج می‌باشد بدین صورت که زمانی به احتمال پائین شانس بودن نتایج پی می‌بریم که مقدار $Sig.$ از مقدار مورد توافق جامع علمی یعنی $0/05$ کوچکتر باشد (در این پژوهش سطح خطای $0/05$ در نظر گرفته شده است، $\alpha=0/05$). تنها در صورتی که مقدار $Sig.$ به دست آمده از $0/05$ کوچکتر باشد، می‌توانیم به ارائه یک تفسیر علمی از نتایج مبادرت نمائیم. پس زمانی که مقدار $Sig.$ از $0/05$ بزرگتر باشد، آنگاه باید گفت که نتایج در اثر شانس حاصل شده‌اند و لذا نمی‌توان تفسیر علمی از نتایج ارائه داد (حبیب پور و صفری، ۱۳۸۸). همانطور که از جدول (۴) مشاهده می‌شود تمامی $Sig.$ محاسبه شده کمتر از $0/05$ ($\alpha=0/05$) می‌باشند که نشان دهنده معنی دار بودن معادله‌های ۲ و ۳ برای برآورد دوام نمونه‌ها در برابر هوازدهی نمک از لحاظ آماری است.

یکی از مهمترین آزمون‌های آماری برای ارزیابی میزان برآزش یک مدل آزمون t استیودنت (t -test) است. این آزمون نشان می‌دهد که آیا متغیر مستقل قادر است به خوبی تغییرات متغیر وابسته را تبیین کنند یا خیر. اگر مقدار t به دست آمده از معادله رگرسیون بیشتر از مقدار t موجود در جدول‌های آماری باشد نشان دهنده کارایی و مناسب بودن معادله رگرسیون در برآورد متغیر وابسته است. لازم به ذکر است مقدار t موجود در جدول‌های آماری برای درجه‌های آزادی مختلف متغیرها در کتاب‌های آماری محاسبه و به صورت جدول‌هایی ارائه شده است (مهدوی و طاهرخانی، ۱۳۹۰). همانطور که از جدول (۴) مشاهده می‌شود مقدار t به دست آمده از معادله‌های ۲ و ۳ به مراتب بزرگتر از مقدار t موجود در جدول‌های آماری می‌باشد. این موضوع نشان دهنده همبستگی و صحت مناسب بین پارامتر فیزیکی-مکانیکی با مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلین بعد از آزمایش هوازدهی نمک می‌باشد.

جدول ۴. نتایج آزمون‌های آماری برای صحت سنجی پارامتر فیزیکی-مکانیکی

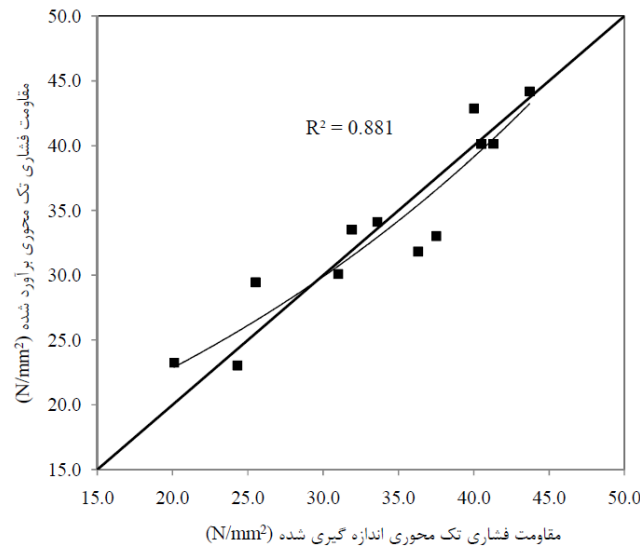
معادله همبستگی	ضریب تعیین (R^2)	t محاسبه شده	t جدول	$Sig.$
$24.10 + 12.49 \ln (PMP_{UCS0}) = UCS_{60}$	۰/۸۶۹	۱۷/۱۲	$\pm 2/145$	۰/۰۰۰
$5.07 + 1.10 \ln (PMP_{BTS0}) = BTS_{60}$	۰/۸۰۱	۱۹/۷۴	$\pm 2/145$	۰/۰۰۰

همانطور که از شکل‌های (۷) و (۸) مشاهده می‌شود نقاط خیلی نزدیک به خط قطری هستند که نشان دهنده دقت مناسب برآورد مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلین بعد از آزمایش هوازدهی با استفاده از پارامتر فیزیکی-مکانیکی است (معادله‌های ۲ و ۳). مقدار ضریب تعیین بین مقدار اندازه گیری شده مقاومت فشاری تک محوری و برآورد شده برابر با $0/881$ می‌باشد (شکل ۷). این در صورتی است که مقدار ضریب تعیین بین مقاومت کششی برزیلین اندازه گیری شده و برآورد شده برابر با $0/817$ می‌باشد (شکل ۸).

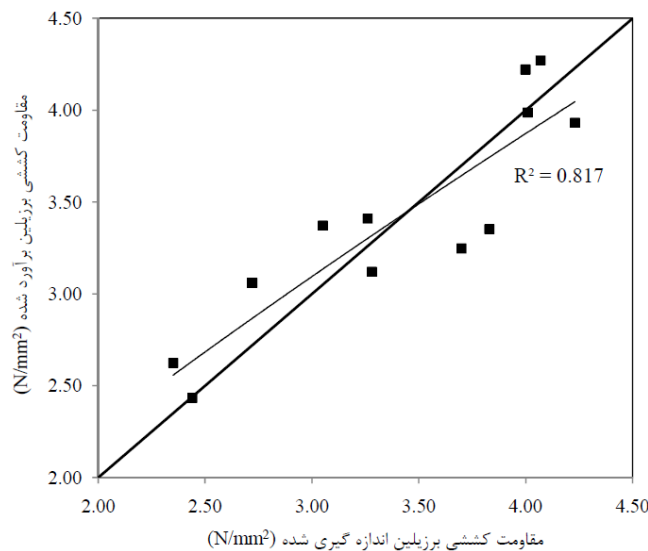
برای بررسی دقت پارامتر فیزیکی-مکانیکی برای برآورد دوام نمونه‌ها از خط قطری یا خط ۱:۱ استفاده شده است. به این منظور مقادیر برآورد شده مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلین نمونه‌ها از معادله‌های ۲ و ۳ با مقادیر واقعی اندازه گیری شده آن‌ها بعد از آزمایش هوازدهی نمک مقایسه و ضرایب تعیین بین آن‌ها تعیین شده‌اند. هر چه توزیع و پراکندگی نقاط به خط قطری نزدیک تر باشند یا روی آن قرار گیرند نشان دهنده برآوردی دقیق‌تر از دوام نمونه‌ها با استفاده از معادله‌های ۲ و ۳ است.

حال این نتایج نشان می دهد که استفاده از پارامتر فیزیکی-مکانیکی بر اساس مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلین (به ویژه مقاومت فشاری تک محوری) می-توانند در برآورد دوام نمونه ها در برابر هوازدگی نمک کارآمد و مفید باشد.

بر اساس مقایسه ضرایب تعیین و خط قطری، مقاومت فشاری تک محوری مقدار ضریب تعیین بالاتری نسبت به مقاومت کششی برزیلین دارند. بنابراین مقاومت فشاری تک محوری نسبت به مقاومت کششی برزیلین دارای دقت تقریباً بیشتری در برآورد دوام نمونه ها در برابر هوازدگی نمک دارد. به هر



شکل ۷. مقادیر مقاومت فشاری تک محوری اندازه گیری شده در برابر مقادیر برآورد شده از معادله ۲



شکل ۸. مقادیر مقاومت کششی برزیلین اندازه گیری شده در برابر مقادیر برآورد شده از معادله ۳

حضور نمک های متبلور در بسیاری از مناطق ایران از جمله مناطق بیابانی و نیمه بیابانی، سواحل شمالی و جنوبی می تواند

۴- نتیجه گیری

میانگین قطر حفره‌ها و خصوصیات مکانیکی (مقاومت فشاری تک محوری یا مقاومت کششی برزیلین) می‌باشد. تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد پارامتر فیزیکو-مکانیکی دارای دقت مناسبی برای برآورد مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلین (به ویژه مقاومت فشاری تک محوری) و در نتیجه دوام نمونه‌ها در برابر هوازدگی نمک دارد.

در نهایت با استفاده از پارامتر فیزیکو-مکانیکی معرفی شده در پژوهش حاضر می‌توان از انجام آزمایش زمانبر، طاقت فرسا و هزینه بر هوازدگی نمک که نیاز به تهیه تعداد زیادی نمونه دارد صرف‌نظر کند.

سازي بخشی از نمونه های آزمایش نویسندگان را یاری کردند قدردانی می‌گردد. از معاونت پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس به خاطر حمایت مالی قدردانی می‌شود. همچنین از زحمات مدیریت و پرسنل معادن تراورتن‌های شهرستان‌های آذرشهر، محلات و فیروزکوه تشکر می‌گردد.

منجر به وقوع هوازدگی نمک شود. این باعث زوال‌پذیری و در نتیجه کاهش دوام سنگ نماهای استفاده شده در ساختمان‌های این مناطق شود. در نتیجه ارزیابی و برآورد دوام سنگ‌ها در برابر هوازدگی نمک قبل از انتخاب آن‌ها برای استفاده در نمای بیرونی ساختمان‌ها امری ضروری و غیر قابل اجتناب است.

در پژوهش حاضر، یک پارامتر فیزیکو-مکانیکی برای برآورد سریع مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلین و در نتیجه دوام نمونه‌های تراورتن در برابر هوازدگی نمک معرفی شد. این پارامتر بر اساس ترکیبی از جذب آب،

تشکر و قدردانی

محققین پژوهش حاضر بر خود لازم می‌دانند از زحمات جناب آقای دکتر محسن رنجبران عضو هیئت علمی بخش زمین شناسی دانشگاه تهران که زحمت مطالعه مقاطع نازک را متقبل شده‌اند تشکر نمایند. از آقای احمد ذلولی که در تهیه و آماده

منابع

- حبیب‌پور، ک.، صفری، ر.، ۱۳۸۸. راهنمای جامع کاربرد SPSS در تحقیقات پیمایشی (تحلیل داده‌های کمی)، چاپ دوم، انتشارات لویهف متفکران، ۸۶۱ صفحه.
- مهدوی، م.، طاهرخانی، م.، ۱۳۸۳. کاربرد آمار در جغرافیا. چاپ اول، نشر قومس، تهران، ۴۲۰ صفحه.
- Angeli, M., Bigas, J.P., Benavente, D., Menendez, B., Hebert, R., David, C., 2007. Salt crystallization in pores: quantification and estimation of damage. *Environmental Geology*, 52: 205–213.
- Angeli, M., Heber, R., Menendez, B., David, C., Bigas, J-P., 2010. Influence of temperature and salt concentration on the salt weathering of a sedimentary stone with sodium sulphate. *Engineering Geology*, 115: pp 193–199.
- Anon, 1979. Classification of rocks and soils for engineering geological mapping: part 1: Rock and soil materials. *Bulletin Association Engineering Geology*, 19: 355–371.
- Bayram, F., 2012. Predicting mechanical strength loss of natural stones after freeze-thaw in cold regions. *Cold Regions Science and Technology*, 83–84: 98–102.
- Bell, F.G., 1993. Durability of carbonate rock as building stone with comments on its preservation. *Environmental Geology*, 21: 187–200.
- Benavente, D., Garcia del Cura, M.A., Fort, R., Ordonez, S., 1999. Thermodynamic modeling of changes induced by salt pressure crystallization in porous media of stone. *Journal of Crystal Growth*, 204:168–178.
- Benavente D, Garcia del Cura MA, Bernabeu A, Ordonez S., 2001. Quantification of salt weathering in porous stones using experimental continuous partial immersion method. *Engineering Geology*, 59: 313–25.
- Benavente, D., García del Cura, M.A., Fort, R., Ordóñez, S., 2004. Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength. *Engineering Geology*, 74: 113–127.
- Benavente, D., Martinez, J., Cueto, N., Cura, M.A, 2007a. Salt weathering in dual-porosity building dolostones. *Engineering Geology*, 94: 215–226.
- Benavente, D., Martinez-Martinez, J., Garcia del Cura, M.A., Can averas, M.A., 2007b. The influence of petrophysical properties on the salt weathering of porous building rocks. *Environmental Geology*, 52: 215–224.
- Chen, T.C., Yeung, M.R., Mori, N., 2004. Effect of water saturation on deterioration of welded tuff due to freeze-thaw action. *Cold Regions Science and Technology*, 38: 127–136.

- Cultrone, G., Luque, A., Sebastián, E., 2012. Petrophysical and durability tests on sedimentary stones to evaluate their quality as building materials. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 45: 415–422.
- EN 12370, 1999. Natural stone test methods - Determination of resistance to salt crystallization. (FOREIGN STANDARD).
- Ehrlich, R., Crabtree, S.J., Horkowitz, K.O., Horkowitz, J.P., 1991. Petrography and reservoir physics I, objective classification of reservoir porosity. *AAPG Bulletin*, 75: 1547–1562.
- Flatt, R.J., 2002. Salt damage in porous materials: how high supersaturations are generated. *Journal of Crystal Growth*, 242: 435–454.
- Goudie, A.S., 1999a. A comparison of the relative resistance of limestones to frost and salt weathering. *Permafrost and Periglacial Processes*, 10, 309–316.
- Goudie, A.S., 1999b. Experimental salt weathering of limestone in relation to rock properties”, *Earth Surface Processes and Landforms*, 24: 715–724.
- Hale, P.A., Shakoor, A., 2003. A laboratory investigation of the effects of cyclic heating and cooling, wetting and drying, and freezing and thawing on the compressive strength of selected sandstones. *Environmental and Engineering Geoscience*, 9: 117–130.
- ISRM., 1981. Rock characterization testing and monitoring. ISRM suggested methods. Pergamon Press, Oxford.
- ISRM., 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. In: Ulusay R, Hudson J.A (Eds.), Suggested methods prepared by the commission on testing methods, 1974–2006.
- Jamshidi, A., Nikudel, M.R., Khamchian, M., 2013. Estimating the durability of building stones against Salt crystallization: considering the physical properties and strength characteristics. *Journal of Geopersia*, 3(2): 35–48.
- Kozłowski, R., Magiera, J., Weber, J., Haber, J., 1990. Decay and conservation of Princeszow porous limestone, Part 1. *Lithology and weathering. Studies in Conservation*, 35; 205–221.
- Nicholson, D., 2001. Pore properties as indicators of breakdown mechanisms in experimentally weathered limestone. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26: 819–838.
- Nicholson, D.T., Nicholson, F.H., 2000. Physical deterioration of sedimentary rocks subjected to experimental freeze-thaw weathering. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25: 1295–1307.
- Ordóñez, S., Fort, R., García del Cura, M.A., 1997. Pore size distribution and the durability of a porous limestone. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 30: 221–230.
- Richardson, B.A., 1991. The durability of porous stones. *Stone Industries*, 26 (10): 22–25.
- Rodriguez-Navarro, C., Doehne, E., 1999. Salt weathering: influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24: 191–209.
- Rodriguez-Navarro, C., Doehne, E., Sebastian, E., 2000. How does sodium sulfate crystallize? Implications for the decay and testing of building materials. *Cement and Concrete Research*, 30: 1527–1534.
- Ruiz-Agudo, E., Mees, F., Jacobs, P., Rodriguez-Navarro, C., 2007. The role of saline solution properties on porous limestone salt weathering by magnesium and sodium sulfates. *Environmental Geology*, 52: 269–281.
- Scherer, G., 1999. Crystallization in pores”, *Cement and Concrete Research*, 29: 1347–1358.
- Schneider, C., Gommeaux, M., Fronteau, G., Oguchi, C.T., Eyssautier, S., Kartheuser, B., 2011. A comparison of the properties and salt weathering susceptibility of natural and reconstituted stones of the Orval Abbey (Belgium). *Environmental Earth Sciences*, 63: 1447–1461.
- Sousa, M.O., Suarez del Rio, M., Calleja, L., Argandona, V., Rodriguez, A., 2005. Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites”, *Engineering Geology*, 77: 153–168.
- Topal, T., Doyuran, V., 1997. Engineering geological properties and durability assessment of the Cappadocian tuff. *Engineering Geology*, 47:175–187.
- Tsui, N., Flatt, R., Scherer, G., 2003. Crystallization damage by sodium sulfate. *Journal of Cultural Heritage*, 4: 109–115.
- Tuğrul, A., 2004. The effect of weathering on the pore geometry and compressive strength of selected rock types from Turkey. *Engineering Geology*, 75: 215–227.
- Urosevic, M., Pardo, E., Cardell, C., 2010. Rough and polished travertine building stone decay evaluated by a marine aerosol ageing test. *Construction and Building Materials*, 24: 1438–1448.
- Valdeon, L., de Freitas, M.H., King, M.S., 1996. Assessment of the quality of building stones using signal processing procedures. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 29: 299–308.
- Winkler, E. M., 1994. *Stone in Architecture, properties, durability*. Third Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Yavuz, A.B., 2006. Deterioration of the volcanic kerb and pavement stones in a humid environment in the city centre of Izmir, Turkey. *Environmental Geology*, 51: 211–227.
- Yu, S., Oguchi, C., 2010. Role of pore size distribution in salt uptake, damage, and predicting salt susceptibility of eight types of Japanese building stones. *Engineering Geology*, 115: 226–236.
- Zedef, V., Kocak, K., Doyen, A., Ozsen, H., Kecec, B., 2007. Effect of salt crystallization on stones of historical buildings and monuments, Konya, Central Turkey. *Building and Environment*, 42: 1453–1457.

Zeza, U., 1990. Physical- mechanical properties of quarry and building stones. In: Veniale, F., Zezza, U. (Eds.), Analytical Methodologies for Investigation of Damage Stones, Pavia, 1 – 20.